

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Návrh a realizace pracoviště pro měření vibrací
v laboratoři senzorů neelektrických veličin**

Design and Realisation of Laboratory Experiment for
Measurement of Vibrations

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Petlák**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma: Návrh a realizace pracoviště pro měření vibrací v laboratoři senzorů
neelektrických veličin
Design and Realisation of Laboratory Experiment for Measurement
of Vibrations

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Řada úloh pro měření a testování je dnes vyhodnocována s využitím technologie Virtuální instrumentace. Jedná se o doplnění PC komponentou pro měření či generování signálů a SW komponentou, která zajistí automatizaci úlohy či sofistikované zpracování signálu. Práce se zabývá komplexním řešením pracoviště měření vibrací struny a zejména vývojem SW v LabVIEW pro automatizaci úlohy měření v laboratoři senzorů neelektrických veličin.

Body zadání:

1. Seznámení se s požadavky na úlohu měření kmitání struny a vibrací konstrukce.
2. Definování koncepce úlohy a koncepce obslužné aplikace. (návrh mechanické konstrukce a umístění snímačů, měření předepnutí struny)
3. Seznámení se s oblastí virtuální instrumentace a prostředím LabVIEW.
4. Navržení koncepce obslužného SW úlohy. (měření a ukládání dat do DB, vizualizace měření, ovládání buzení struny)
4. Implementace SW.
5. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9..
- [2] BRESS, Thomas J. *Effective labview programming*. 1st ed. Allendale: NTS Press, 2013, 701 s. ISBN 978-1934891087.
- [3] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. *LabVIEW: advanced programming techniques*. 2nd ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2007. ISBN 978-0-8493-3325-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Havířově dne 30.4.2019



Marek Petlák

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. a panu Ing. Davidu Valovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce, odborníkům z Katedry neželezných kovů, rafinace a recyklace za možnost výroby částí laboratorního přípravku a panu Jakubu Laborovi za možnost návštěvy Janáčkovy konzervatoře v Ostravě.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a tvorbou přípravku pro měření stojatého vlnění na struně. Vibrace struny jsou snímány snímači a elektrické signály ze snímačů jsou digitalizovány měřicí kartou NI USB-6210. Data se následně vyhodnocují v aplikaci vyvinuté v prostředí LabVIEW. Snímače jsou na přípravku umístěny v různých polohách pro demonstraci polohy uzlových bodů stojatého vlnění. Tento přípravek bude sloužit jako měřicí úloha pro studenty v laboratoři senzorů a měření, která studenty seznámí s problematikou stojatého vlnění, snímání kmitů a zpracování naměřeného signálu.

Klíčová slova

Vibrace, chvění, kmitání, indukční snímač, LabVIEW, stojaté vlnění, uzlový bod, kmitna, karta sběru dat, Fourierova transformace

Abstract

This bachelor's thesis covers the design and making of a rig to measure standing wave oscillations in a string. The string vibrations are picked up by sensors and the electrical signals from the sensors are digitized by an NI USB-6210 measuring card. The data is then analysed using a custom-developed LabVIEW application. The sensors are located such that they allow the demonstration of node and antinode locations on the string. The rig is meant to be used as a sensors and measurements lab task for students, aiding the study of standing waves, oscillation sensing and the analysis of acquired data.

Key words

Vibration, quivering, oscillation, induction sensor, LabVIEW, standing wave, node, antinode, data collection card, Fourier transform

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	- 7 -
Seznam obrázků	- 8 -
Seznam tabulek	- 10 -
1 Úvod	- 11 -
2 Vibrace	- 12 -
2.1 Výskyt vibrací	- 12 -
2.1.1 Technické obory	- 12 -
2.1.2 Hudební nástroje	- 13 -
2.2 Způsoby měření vibrací	- 15 -
2.2.1 Indukční snímače	- 15 -
2.2.2 Akcelerometry	- 16 -
2.2.3 Mikrofony	- 17 -
3 Laboratorní přípravek	- 18 -
4 Aplikace pro ovládání a měření úlohy	- 23 -
4.1 Princip programování v prostředí LabVIEW	- 23 -
4.2 Vlastní program k přípravku	- 24 -
5 Měření	- 31 -
5.1 Měřicí řetězec	- 31 -
5.2 Analýza signálu ze snímače v časové oblasti	- 32 -
5.3 Analýza signálu ze snímače ve frekvenční oblasti	- 33 -
6 Úloha pro měření vzdálenosti kuličky pomocí změny odporu	- 38 -
Závěr	- 40 -
Použitá literatura	- 41 -
Seznam příloh	- 42 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
C	Kapacita (F)
DAQ	Sběr dat (Data Acquisition)
F	Síla natažení struny (N)
FFT	Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
f_0	Mezní frekvence filtru (Hz)
f_{vz}	Vzorkovací frekvence (Hz)
l	Délka struny (m)
N_w	Počet vzorků na časové okno (-)
n	Řád harmonické frekvence (-)
R	Odpor (Ω)
S	Obsah (m^2)
T_w	Délka časového okna (s)
Δ_f	Frekvenční krok FFT (Hz)
μ	Hmotnost délkové jednotky struny ($kg \cdot m^{-1}$)
ρ	Měrný elektrický odpor materiálu ($\Omega \cdot (mm)^2 \cdot m^{-1}$)
ρ_d	Odpor délkové jednotky struny ($\Omega \cdot m^{-1}$)

Seznam obrázků

Obrázek 1	Prvky pro tlumení vibrací.....	12 -
Obrázek 2	Znázornění frekvencí vytvářených zařízením v časové a frekvenční oblasti.....	13 -
Obrázek 3	Cembalo na Janáčkově konzervatoři v Ostravě.....	14 -
Obrázek 4	Mechanika cembala.....	14 -
Obrázek 5	Detail trsacího mechanismu cembala.....	15 -
Obrázek 6	Konstrukce kytarového snímače.....	16 -
Obrázek 7	Schéma strunového tenzometru, l_0 – délka struny, C – budicí a snímací cívka, S – struna.....	16 -
Obrázek 8	Konstrukce akcelerometru.....	17 -
Obrázek 9	Příklady směrových charakteristik mikrofonů.....	17 -
Obrázek 10	Konstrukce přípravku.....	18 -
Obrázek 11	Detail napínacího mechanismu pro úlohu měření kmitání struny....	19 -
Obrázek 12	Kobylky podpírající strunu (nalevo izolační).....	20 -
Obrázek 13	Způsob uchycení struny.....	20 -
Obrázek 14	Elektromechanické buzení struny.....	21 -
Obrázek 15	Kontaktní mikrofon pro snímání vibrací konstrukce.....	22 -
Obrázek 16	Součet dvou čísel (nalevo blokový diagram, napravo čelní panel)...	23 -
Obrázek 17	Čelní panel aplikace.....	25 -
Obrázek 18	Průběh aplikace.....	26 -
Obrázek 19	Sběr dat a průběžné vyhodnocování.....	27 -
Obrázek 20	Konfigurace časů v aplikaci.....	28 -
Obrázek 21	Aplikace váhového okna.....	28 -
Obrázek 22	Konfigurace měřicí karty v blokovém diagramu aplikace LabVIEW.....	29 -
Obrázek 23	Konfigurace kanálů.....	29 -
Obrázek 24	Měřicí smyčka aplikace.....	30 -
Obrázek 25	Schéma měření.....	31 -
Obrázek 26	Průběh odezvy struny v čase (snímač v polovině délky struny).....	32 -
Obrázek 27	Průběh odezvy struny těsně po vybuzení.....	33 -
Obrázek 28	Průběh odezvy struny po ustálení.....	33 -
Obrázek 29	Znázornění polohy snímačů k uzlovým bodům harmonických frekvencí.....	34 -
Obrázek 30	Měření intenzity vyšších harmonických.....	36 -
Obrázek 31	Výsledná FFT pro snímač umístěný v polovině (bez použití okenní funkce).....	36 -
Obrázek 32	Výsledná FFT pro snímač umístěný v polovině (s použitím okenní funkce).....	37 -
Obrázek 33	Nasměrování strun.....	38 -

Obrázek 34	Detail napínacího mechanismu pro úlohu se dvěma strunami.....- 39 -
Obrázek 35	Řešení izolace strun.....- 39 -

Seznam tabulek

Tabulka 1	Uzlové body na struně.....	- 35 -
-----------	----------------------------	--------

1 Úvod

Cílem práce je sestavení přípravku pro měření stojatého vlnění na struně, který je ovládán pomocí aplikace napsané v LabVIEW. Struna je buzena elektromechanicky a je snímána indukčními kytarovými snímači. Snímače jsou zapojeny na analogové vstupy měřicí karty NI USB-6210. Získaná data z měření se zpracovávají v aplikaci napsané v LabVIEW a zobrazují se v okně aplikace pro měření.

Ve druhé kapitole je rozebrán výskyt a využívání vibrací v různých oborech. Jsou zde popsány některé metody snímání a způsoby generování zvuků hudebními nástroji.

Třetí kapitola se zabývá návrhem a následnou tvorbou laboratorního přípravku určeného k měření stojatého vlnění na struně. Popisuje a zobrazuje použité technická řešení přípravku.

Čtvrtá kapitola popisuje návrh a implementaci aplikace v LabVIEW. Je zde vyobrazen čelní panel a popsány části blokového diagramu aplikace. Popisuje průběh aplikace a metody použité ve zpracování měřeného signálu.

Pátá kapitola popisuje použitý způsob měření a metody zpracování naměřených dat v LabVIEW.

V šesté kapitole je popsána mechanická konstrukce úlohy, která byla na přípravku realizována nad rámec bakalářské práce.

2 Vibrace

Potřeba měřit vibrace (kmitání, chvění) je v celé řadě oborů. Z technických oborů obvykle tam, kde nám data z takových měření mohou poskytnout informaci o průběhu právě prováděného děje nebo indikace vibrací u procesů, kde by vibrace měly nežádoucí vliv (směrová krystalizace). Měřením a následným vyhodnocením vibrací (např. porovnáním s referenčními daty) můžeme zjistit opotřebení strojních součástí, a tak zajistit jejich včasnou výměnu (prediktivní údržba).

2.1 Výskyt vibrací

Vibrace se vyskytují na místech, která generují nebo přenášejí mechanický pohyb. Tyto mohou být žádoucí a nežádoucí. S vibracemi se také setkáváme u hudebních nástrojů, které jsou jejich podstatou.

2.1.1 Technické obory

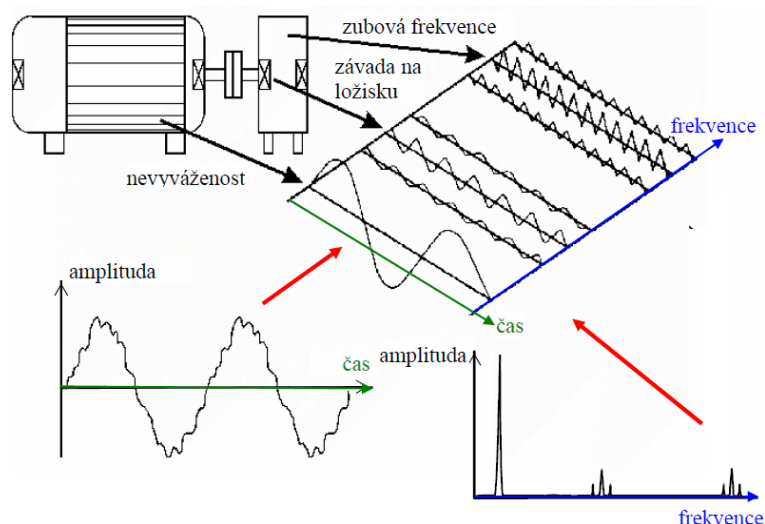
V technických oborech můžeme vibrace využívat, eliminovat nebo diagnostikovat. Vibrace můžeme využívat tam, kde potřebujeme pohybem zpracovat nějakou surovinu (prosévací stroje, vibrační dopravníky, ultrazvukové čističky) nebo tuto surovinu opracovat (vibrační bruska).

Pro eliminování se využívají různá technická řešení. Například se mohou využít speciální podložky, na kterých je zařízení upevněno (Obr. 1).



Obr. 1 Prvky pro tlumení vibrací [1]

Způsob kontroly strojů, u které se zkoumají vibrace se nazývá vibrodiagnostika, při níž se využívají vibrometry (rychle reagující měřiče zrychlení). Vibrace zařízení jsou velmi citlivým ukazatelem technického stavu stroje. Vibrace se týkají zejména ložisek, hřídel, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážených rotačních součástí, vůlí rotačních součástí atd. Nejjednodušší je provést měření v celém frekvenčním pásmu které určuje norma (např. 10–1000 Hz) a poté z naměřeného signálu získat spektrum (Obr. 2). [2]



Obr. 2 Znáznornění frekvencí vytvářených zařízením v časové a frekvenční oblasti [3]

2.1.2 Hudební nástroje

Hudební nástroje generují zvuk různými způsoby. Dechové nástroje pracují na principu kmitání vzduchového sloupce. Tento může být rozkmitán opět různými způsoby. Kmity ve flétně způsobuje vzduch proudící na hranu nástroje. Jeden plátek připevněný na tzv. hubičce využívají k tvorbě kmitů např. klarinet, saxofon. Dvouplátkový strojek využívají např. hoboje, fagot. U žesťových nástrojů jsou využívány rty hráče.

Strunné nástroje využívají mechanické působení k rozechvění struny. Pro rozechvění strun na harfě využívá hráč prsty. Struny klavíru jsou rozechvívány pomocí plstěných kladívek. Tyto vibrace se přenášejí na rezonátor (u klavíru rezonanční deska, u houslí tělo nástroje), kde se původní zvuk částečně mění. Frekvence zůstává stejná, mění se barva tónu, tedy intenzity harmonických složek obsažených v tónu. Resonanční deska převádí chvění z materiálu do vzduchu, a tedy zesiluje zvuk vydávaný nástrojem.

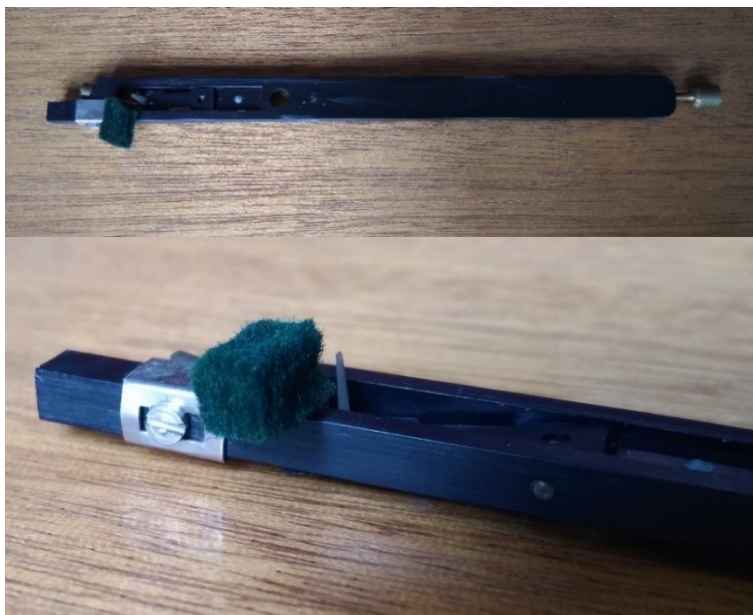


Obr. 3 Cembalo na Janáčkově konzervatoři v Ostravě

U cembala je to trsací mechanismus, který strunu rozechvěje (Obr. 3, Obr. 4, Obr. 5). Po zmáčknutí klávesy nástroje trsací mechanismus zavádí o příslušnou strunu a ta začne chvěním generovat zvuk.



Obr. 4 Mechanika cembala



Obr. 5 Detail trsacího mechanismu cembala

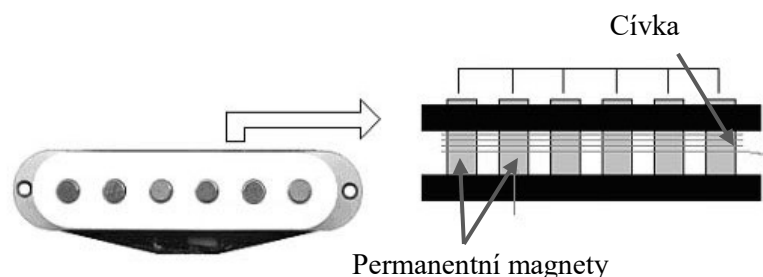
2.2 Způsoby měření vibrací

Pro možnost vyhodnocení vibrací materiálu nebo zvuku je potřeba vibrace vhodně nasnímat. Snímače kmitů materiálu, nebo zvuku jsou vlastně elektromechanické měniče. Tyto mohou pracovat na různých principech.

2.2.1 Indukční snímače

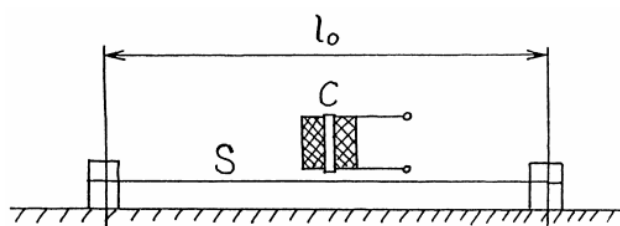
Indukční snímače mají tu výhodu, že je jimi možno detekovat chvění pevných těles bezkontaktně. Pracují do vzdálenosti několika desítek milimetrů. Snímá se jimi pohyb, rychlost otáček, natočení, tloušťka materiálu, přiblížení atd. [4]

Kytarové indukční snímače obsahují jádro tvořené šesti permanentními magnety (pro každou strunu kytary jeden). Na jádro je navinuta cívka, která tvoří výstup snímače. Při chvění struny v blízkosti permanentního magnetu vznikají ve struně vířivé proudy, jejichž změny se indukují do cívky snímače. Jedná se tedy o pasivní snímač, jelikož nepotřebuje napájení (Obr. 6).



Obr. 6 Konstrukce kytarového snímače [5]

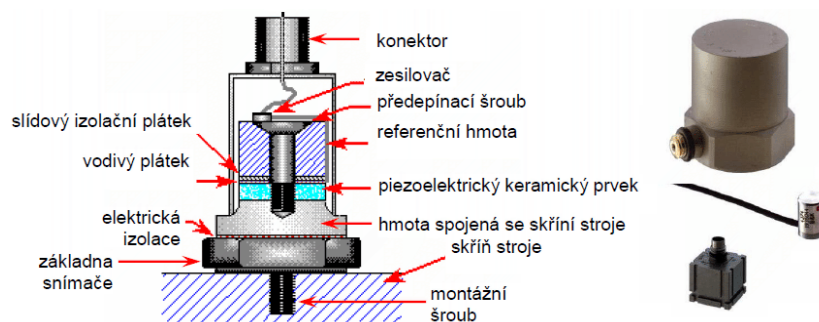
Stejný způsob snímání využívají strunové tenzometry (Obr. 7). Strunové tenzometry využívají k měření závislost deformace (natažení) struny na její frekvenci. Snímač se skládá ze struny napnuté mezi dvěma úchyty, budicí a snímací cívky a pouzdra snímače. Krajní body, na kterých je upevněna struna, jsou uzpůsobeny pro montáž na zkoumaný materiál (otvory pro našroubování, zalití do betonu, asfaltu atd.). Již při malé změně vzdálenosti krajních kotvících bodů lze zaznamenat změnu frekvence kmitů struny. Kmity struny jsou snímány indukčním snímačem s permanentním magnetem nebo budicí cívkou. [6]



Obr. 7 Schéma strunového tenzometru, l_0 – délka struny, C – budicí a snímací cívka, S – struna [6]

2.2.2 Akcelerometry

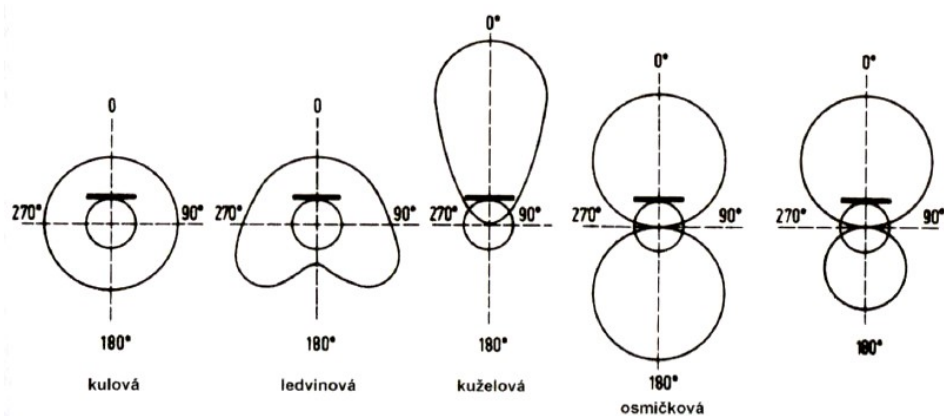
Nejčastějším snímačem používaným ve vibrodiagnostice je akcelerometr. Piezoelektrický akcelerometr je založen na piezoelektrickém jevu. Vlivem namáhání piezoelektrického materiálu vzniká elektrické napětí úměrné zrychlení (Obr. 8). Takové snímače mohou být použitelné v pásmu od několika Hz až po desítky kHz. Pro měření je nutné snímač vhodně umístit a upevnit. Upevnění snímače musí být dostatečně tuhé, aby se co největší spektrum vibrací přenášelo z konstrukce na snímač. Pro upevnění snímačů se používají šrouby, kyanoakrylátová lepidla, zubní cement, včelí vosk aj. [2][3][7]



Obr. 8 Konstrukce akcelerometru [2]

2.2.3 Mikrofony

Mikrofony slouží k převodu zvuku na elektrický signál. Akustický signál (což je změna tlaku) rozechvívá mechanický systém (membránu), jehož pohyb je vhodně převeden na elektrický signál. Mohou být elektrodynamické (membránový, páskový), elektrostatické, elektretové, piezoelektrické aj. U mikrofonů je nutné si všimnout zejména frekvenčních a směrových charakteristik. Směrová charakteristika udává citlivost snímání mikrofonu v závislosti vzájemné polohy zdroje akustického signálu a mikrofonu (Obr. 9). [8]

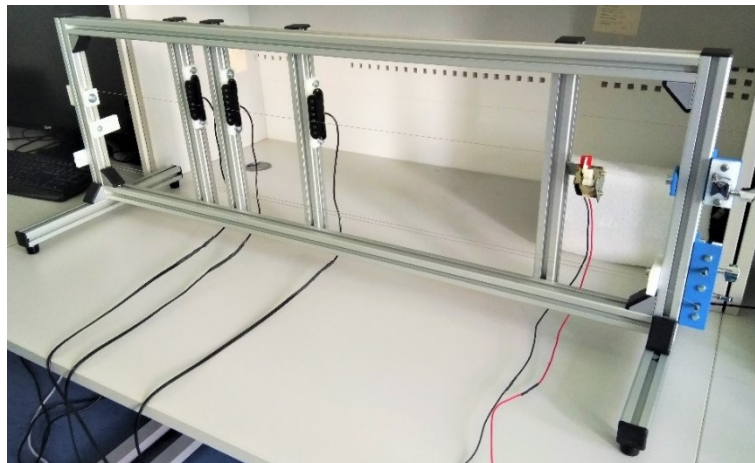


Obr. 9 Příklad směrových charakteristik mikrofonů [8]

3 Laboratorní přípravek

Laboratorní přípravek pro měření kmitů struny je navržen univerzálně pro možnost dalšího rozšíření. Je to mechanicky tuhý rám, který nese všechny potřebné komponenty pro řešení dané úlohy.

Laboratorní přípravek je sestaven z univerzálních hliníkových profilů pro zajištění možné přestavitelnosti přípravku pro variace jednotlivých úloh (Obr. 10). Kvůli délce přípravku zde nebyla možnost napnout běžnou kytarovou strunu. Jako materiál struny byl tedy zvolen Kanthalový drát o průměru 0,5 mm. Tělo přípravku má délku 1 100 mm a délka struny pro generování kmitů je 1 025 mm.



Obr. 10 Konstrukce přípravku

Pro úlohu měření chvění struny má struna charakter pružného prostředí pro generování stojatého vlnění a zároveň je na jednom konci izolována, aby mohla být při rozšíření úlohy využita jako tenzometr ke zjištění napnutí struny velikostí odporu. V tomto případě se však z konstrukčních dispozic odporová dráha neprodlužuje (navíjení struny na ladicí mechanismus), ale změnu odporu vodiče bude možné detekovat kvůli zmenšení průřezu vodiče vlivem napnutí struny (1). Délka struny i její rezistivita jsou konstantní. Na změnu odporu má vliv změna průřezu struny. Pro toto měření by tedy jako namáhaný tenzometr sloužila struna na přípravku a za odpor pro kompenzaci teploty by byla zapojena struna ze stejného materiálu. Tento kompenzační odpor by již nebyl mechanicky namáhán, ale působily by na něj stejné teplotní vlivy.

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (1)$$

Na přípravku je natažena jedna laditelná struna (Obr. 11), kterou je možno elektromechanicky vybudit. Chvění struny je poté snímáno indukčními snímači, které jsou napojeny do DAQ karty. Poloha indukčních snímačů jde měnit stavitelnými příčkami konstrukce. Více snímačů zajišťuje snímání struny v různých bodech.

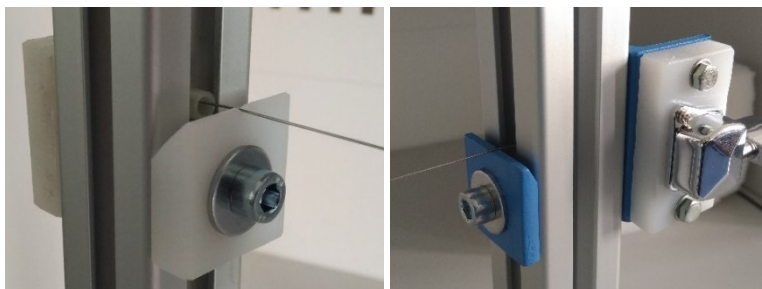


Obr. 11 Detail napínacího mechanismu pro úlohu měření kmitání struny

Kobylky podpírají strunu na obou koncích a umožňují struně vibrovat čistě, bez mechanických nárazů v místě uchycení (Obr. 12). Kobylky mají pro strunu vyfrézované drážky o průměru 3 mm. Zde byl brán ohled na teorii stavby houslí.

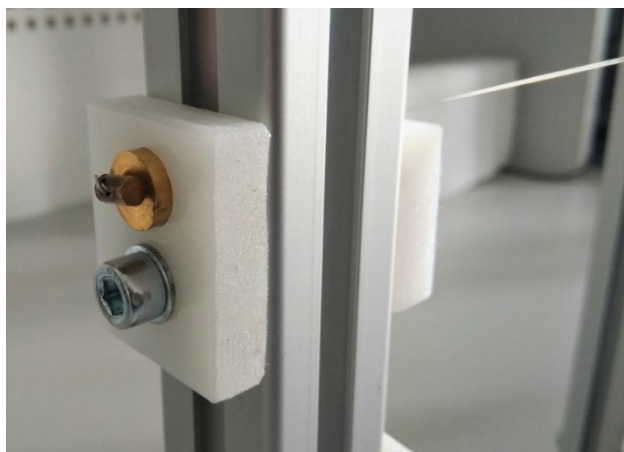
„Drážky na kobylce a malém pražci by neměly být hlubší, než je polovina průměru strun. Musí mít však větší průměr, než má struna. A to z toho důvodu, aby struna byla bočně volná a v drážce se dotýkala materiálu kobylky a pražce jen v jediném bodě. Při dotyku struny v jediném dotykovém bodě na ní vzniká při jejím chvění žádoucí čistý akustický uzel. Když by se struna v drážce dotýkala více než v jednom bodě, kupř. ve dvou bodech trojúhelníkové drážky, struna by nezněla čistě.“ [9]

Struna má průměr 0,5 mm a drážka na kobylce průměr 3 mm. V tomto případě bylo tedy dodrženo pravidlo jediného opěrného bodu struny v místě dotyku.



Obr. 12 Kobylinky podírající strunu (nalevo izolační)

Jeden konec struny je elektricky odizolován od zbytku konstrukce pro možnost rozšíření úlohy o měření napnutí struny pomocí změny jejího odporu v závislosti na změně odporových vlastností vlivem natažení. Je zde použita kobyłka i uchycení struny z polyethylenu a v místě, kde struna vede skrze otvor v konstrukci, je odizolována plastovým průchodem (Obr. 12, Obr. 13).



Obr. 13 Způsob uchycení struny

$$f = \frac{n}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 1,025} \cdot \sqrt{\frac{45}{1,223 \cdot 10^{-3}}} \doteq 93,57 \text{ Hz} \quad (2) [10]$$

Základní frekvenci kmitů struny lze vypočítat dle vztahu (2). Hmotnost délkové jednotky struny μ a síla napnutí struny F byly zjištěny experimentálně. Délka struny l je 1,025 m. Jelikož je základní frekvence struny první harmonická frekvence, je za n dosazeno 1. Sílu natažení struny

F je možno plynule měnit pomocí ladicího mechanismu na přípravku. Sílu je tedy možno upravit tak, aby struna kmitala na požadované frekvenci. [10]

K buzení kmitů na struně slouží elektromagnet s pohyblivým jádrem (Obr. 14). Jádro pohybuje sestavou, která je inspirovaná trsacím mechanismem spinetu (Obr. 5). Elektromagnet je ovládán pomocí aplikace v LabVIEW. Měřicí karta sepne relé, které propojí 24 V obvod k elektromagnetu. V klidovém stavu je jádro elektromagnetu vysunuto pomocí pružiny a struna zatlumena plstěným dusítkem. Po sepnutí elektromagnetu se jádro vtáhne dovnitř, přičemž trsátko rozechvěje strunu.



Obr. 14 Elektromechanické buzení struny

Na konstrukci jde připevnit množství různých snímačů pro variace úlohy. Kontaktním mikrofonom (Obr. 15) byly experimentálně snímány kmity konstrukce přípravku. Signál z piezoelektrického kontaktního mikrofonu je přibližně o jeden řád nižší než ze snímačů indukčních.

V základní konfiguraci aplikace využívá tři indukční snímače. V případě potřeby změny úlohy lze na vytvořené kanály připojit jiné typy snímačů (kontaktní mikrofón, akcelerometr atd.) nebo těmito novým snímačům vytvořit v aplikaci nový kanál pro snímání.



Obr. 15 Kontaktní mikrofon pro snímání vibrací konstrukce

4 Aplikace pro ovládání a měření úlohy

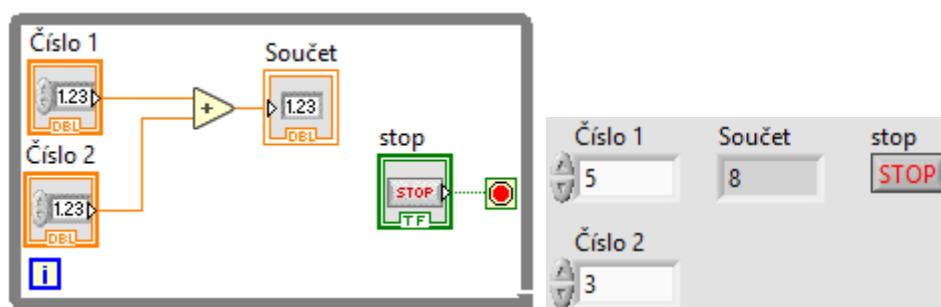
Aplikace pro ovládání přípravku je naprogramována s ohledem na názornost použitého zpracovávání naměřeného signálu z přípravku. Má za úkol nejen ovládat měření, ale také názorně ukázat způsoby zpracovávání dat (filtrace, FFT).

4.1 Princip programování v prostředí LabVIEW

Prostředí LabVIEW je grafický programovací jazyk používaný hlavně v technických oborech. Cílem je omezit náklady spojené s pořizováním často nákladného hardwaru a převést tuto práci počítači. [11]

Protože LabVIEW je grafický programovací jazyk, jednotlivé programovací struktury a funkce jsou zde zastoupeny grafickými symboly. Tyto symboly mohou mít podobu rámečku do které se vkládají funkce (for, while, case atd.) nebo podobu bloků, které se propojují datovými vodiči (součet, ovládací prvek, filtr atd.). [11]

V LabVIEW program neprobíhá postupným vykonáváním řádků, jak tomu bývá u textových programovacích jazyků, ale je vykonáván řízeným tokem (data flow). Zpracovávání tedy probíhá sekvenčně. Zpracovávání dat v bloku se provádí pouze v případě, že má blok na svém vstupu všechna potřebná data. Po zpracování vstupních dat jsou na výstupu bloku výstupní data, které lze opět přivést dále. V LabVIEW jsou jednotlivé proměnné reprezentovány propojujícími vodiči mezi bloky. Prostředí samo alokuje potřebnou paměť pro tyto proměnné nebo pro již vytvořené proměnné tuto paměť zvětší (přidávání prvků do pole). [11]



Obr. 16 Součet dvou čísel (nalevo blokový diagram, napravo čelní panel)

V blokovém diagramu vidíme zapojení a strukturu jednoduché aplikace pro součet dvou čísel (Obr. 16). Jsou zde dva bloky pro zadávání hodnot, blok pro součet a blok pro zobrazení

výsledné hodnoty. Celý výpočet je ve smyčce while, která obsahuje navíc proměnnou obsahující informaci o počtu iterací smyčky a terminál k ukončení smyčky. Po spuštění aplikace se tedy začne cyklicky opakovat výpočet dle zadaných hodnot.

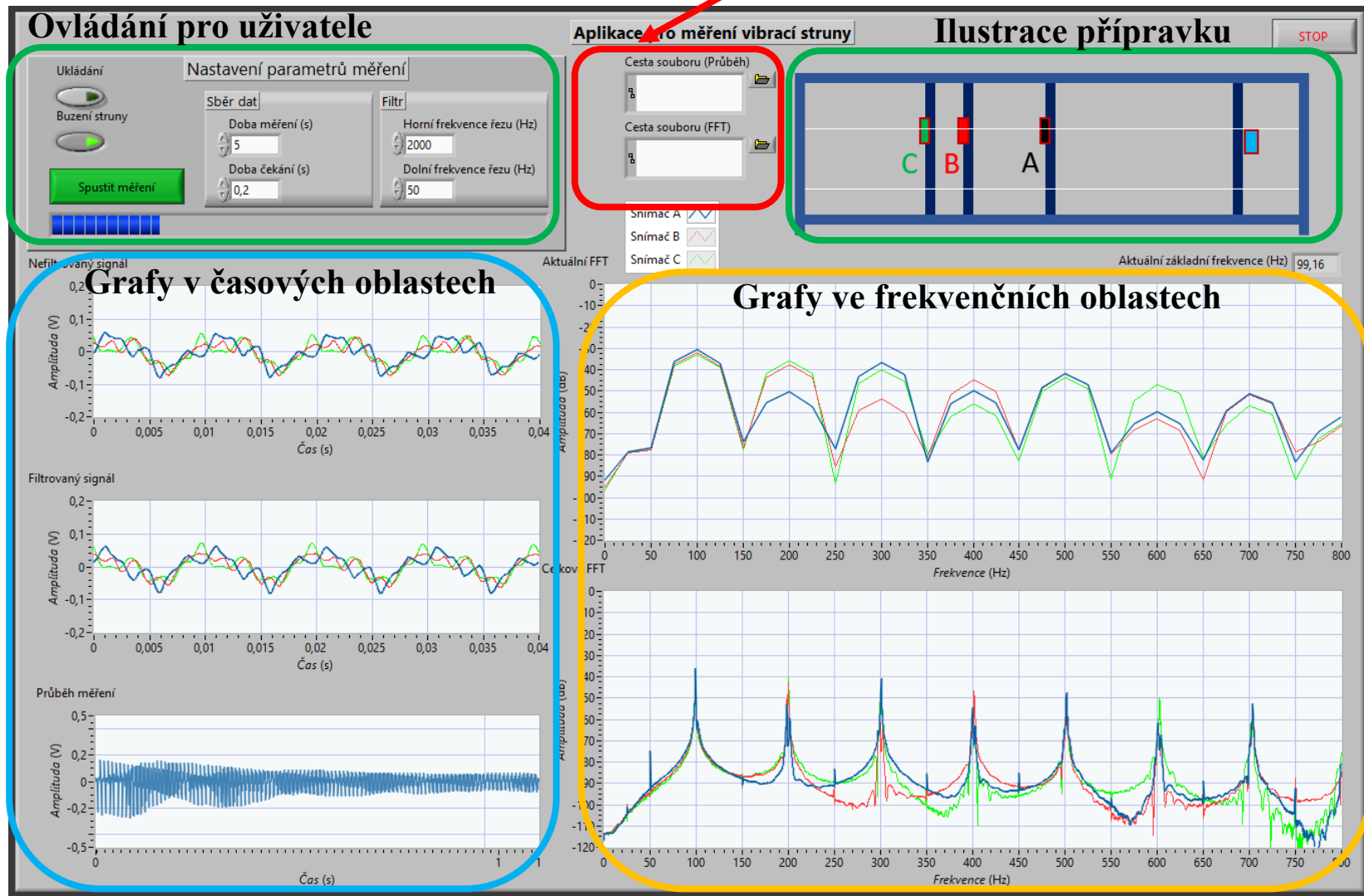
Čelní panel tvoří rozhraní mezi počítačem a uživatelem, a tedy zobrazuje požadované informace (Obr. 16). Tlačítko STOP slouží k ukončení smyčky while, která nemá v tomto příkladu jinou podmínku pro ukončení.

4.2 Vlastní program k přípravku

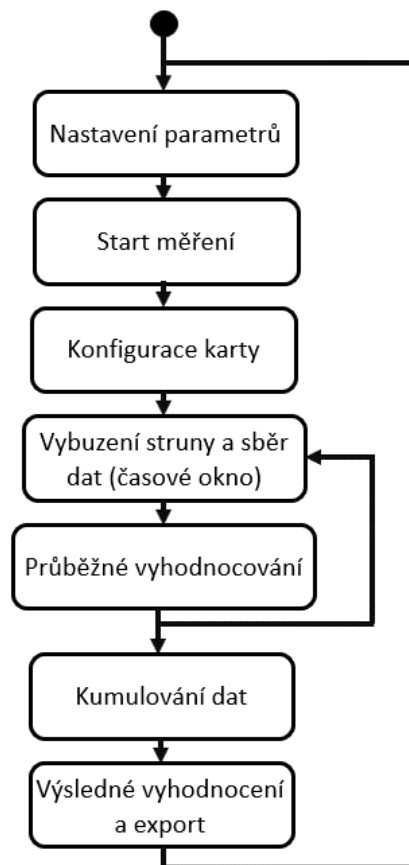
Čelní panel (Obr. 17) obsahuje část pro konfiguraci parametrů, tlačítko pro start měření, indikátor průběhu měření, okna pro zadání místa uložení souborů s hodnotami měření, ilustraci laboratorního přípravku s popisem snímačů a grafy. Grafy zobrazují měřená data před filtrací a po průchodu signálu pásmovou propustí, celkový průběh měření, průběžnou FFT a výslednou FFT z nakumulovaného časového okna. Kromě ukládání hodnot do souboru jde z aplikace exportovat i již zobrazené grafy.

Program je koncipován jako měřicí sekvence (Obr. 18). Po spuštění aplikace buď uživatel ponechá výchozí parametry měření nebo zadá vlastní (doba měření, parametry filtru). Po spuštění tlačítka „Spustit měření“ se nakonfiguruje měřicí karta a sepne se digitální výstup DAQ karty, který vybudí strunu. Poté nastane sběr dat ze snímačů. Vzorkovací frekvence je nastavena pevně na 50 kHz. V průběhu měření se za sebe řadí časová okna. Tím se ukládá celý průběh měření pro další zpracování. Po uplynutí času měření nastaveného uživatelem se ukončí sběr dat a zpracuje se celkový průběh měření (celková FFT, uložení průběhů) a aplikace je připravena pro další měření.

Cesta pro uložení souboru

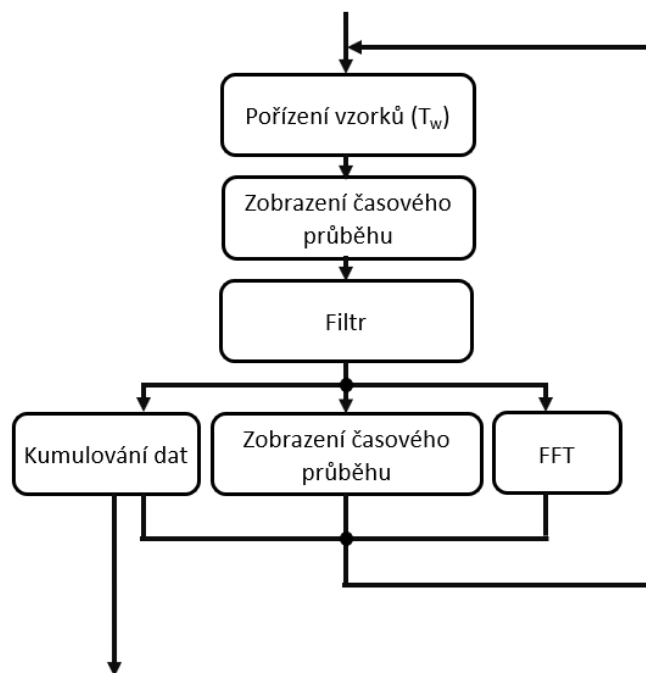


Obr. 17 Čelní panel aplikace



Obr. 18 Průběh aplikace

Vzhledem k povaze měřeného signálu a sběru dat zde nebylo vhodné zajišťovat (pomocí algoritmů) celistvý počet period v časovém okně měřeného signálu, z důvodu spolehlivosti zobrazování průběžné FFT. Tudíž je pro zlepšení výsledků FFT na časové okno aplikována okenní funkce. Na signál je aplikováno Hanningovo okno (Obr. 21). Signál se s takto tvarovanou funkcí vynásobí, přičemž jsou po výpočtu FFT více zřetelné obsažené frekvence v signálu. Tvar této okenní funkce eliminuje vliv okrajů časového okna (částečných period signálu) a ponechá prostřední část časového okna.

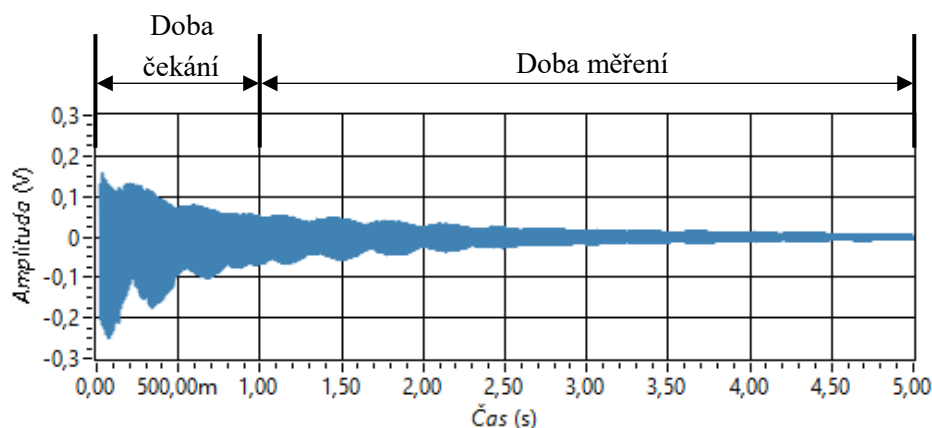


Obr. 19 Sběr dat a průběžné vyhodnocování

Sběr dat a následné vyhodnocování probíhá v pořadí na diagramu viz Obr. 19. Pořízené vzorky časového okna se zobrazí do časového grafu pro nefiltrovaný signál a po průchodu filtrem se tento signál zobrazí do časového grafu pro filtrovaný signál. Z filtrovaného signálu se také počítá a zobrazuje FFT. Každé časové okno se ukládá a řadí za sebe v poli pro následné vyhodnocování.

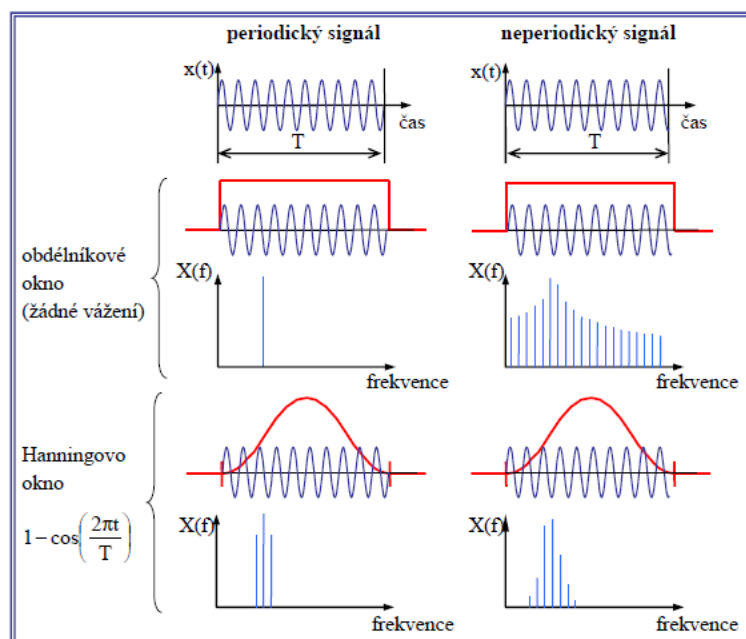
Pro krok na frekvenční ose platí rovnice (3). Z časového okna 0,04 s je tedy krok na frekvenční ose 25 Hz. Proto je kromě průběžné FFT z časového okna počítána také FFT z celého průběhu měření, kde je již krok podle nastavené délky měření menší. Například pro 5 vteřin signálu je krok na frekvenční ose 0,2 Hz (Obr. 31).

$$\Delta_f = \frac{1}{T_w} = \frac{1}{0,04} = 25 \text{ Hz} \quad (3)$$



Obr. 20 Konfigurace časů v aplikaci

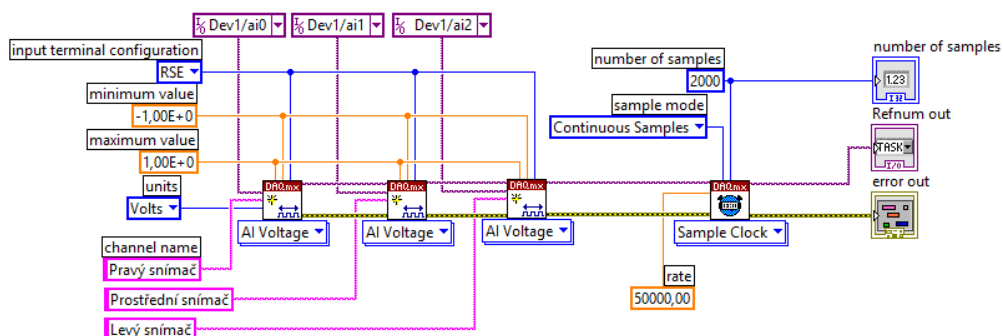
Na FFT z celého průběhu signálu Hanningovo okno již aplikováno není. Jelikož je časové okno dostatečně dlouhé, jsou po zpracování FFT lepší výsledky bez použití okenní funkce (Obr. 31). Pro zlepšení výsledků, kvůli neustálým kmitům na počátku vybuzení struny, je zde možnost nastavit „Dobu čekání“, která se z výpočtu výsledné FFT vynechá (Obr. 20).



Obr. 21 Aplikace váhového okna [3]

Pro demonstraci účinku filtru je v aplikaci vstupní signál filtrován pásmovou propustí aproximace Butterworth druhého řádu s konfigurovatelnými parametry. V čelním panelu aplikace

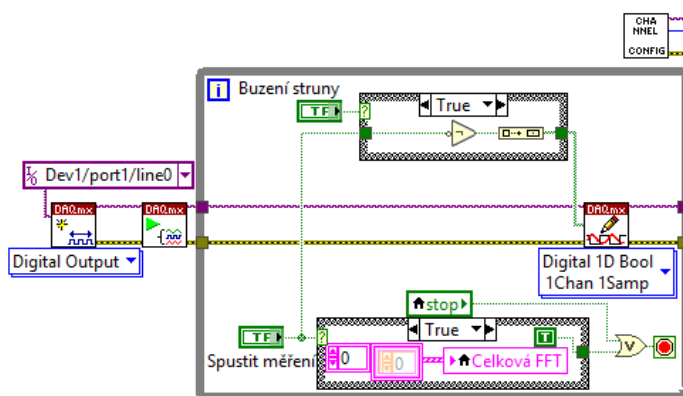
lze nastavit dolní a horní frekvenci zlomu filtru. V základní konfiguraci aplikace je dolní mez nastavena na 50 Hz a horní mez na 2 000 Hz.



Obr. 22 Konfigurace měřicí karty v blokovém diagramu aplikace LabVIEW

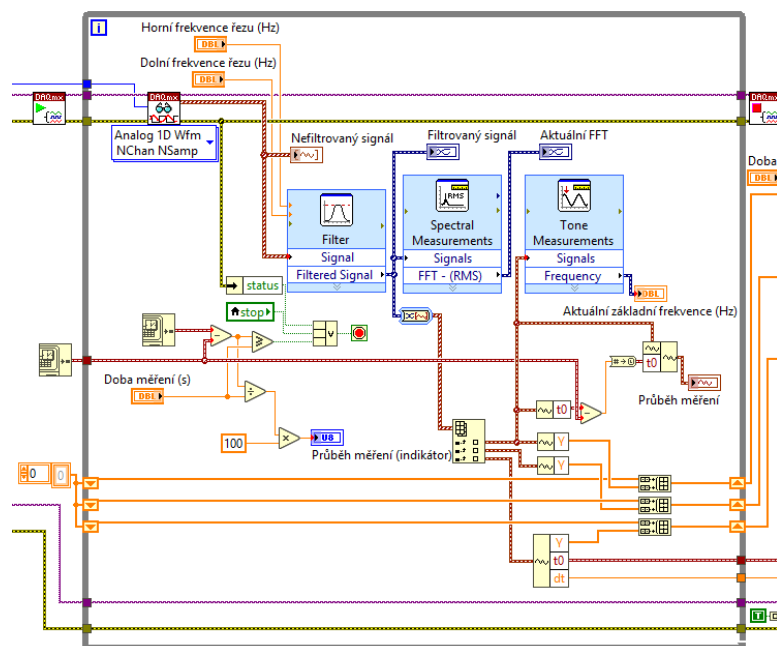
Při konfiguraci měřicí karty se nastaví typ měření RSE (měření proti zemi), napět'ový rozsah od -1 V do 1 V, připojí se název kanálu a vybere se, na jakých kanálech se tyto signály budou měřit a o jaký jde typ signálu (analogový) (Obr. 22). Také se stanoví vzorkovací frekvence kanálu a počet vzorků na časové okno. Zde je vzorkovací frekvence 50 kHz a 2 000 vzorků na časové okno. Z toho vyplývá délka časového okna (4).

$$\frac{1}{f_{vz}} \cdot N_w = \frac{1}{50\,000} \cdot 2\,000 = 0,04 \text{ s} \quad (4)$$



Obr. 23 Konfigurace kanálů

V první části kódu (Obr. 23) se tedy nakonfigurují analogové vstupy DAQ karty a digitální výstup pro ovládání buzení struny. Dojde také k vyčištění grafu pro celkovou FFT z předchozího měření. Tato část kódu také kontroluje, zdali byl zadán pokyn pro spuštění měření (tlačítko „Spustit měření“). Pokud byl tento pokyn zadán, case struktura pošle do podmínky smyčky hodnotu „true“. V tom případě dojde k vybuzení struny pomocí digitálního výstupu DAQ karty, smyčka se ukončí a nastává měření.



Obr. 24 Měřicí smyčka aplikace

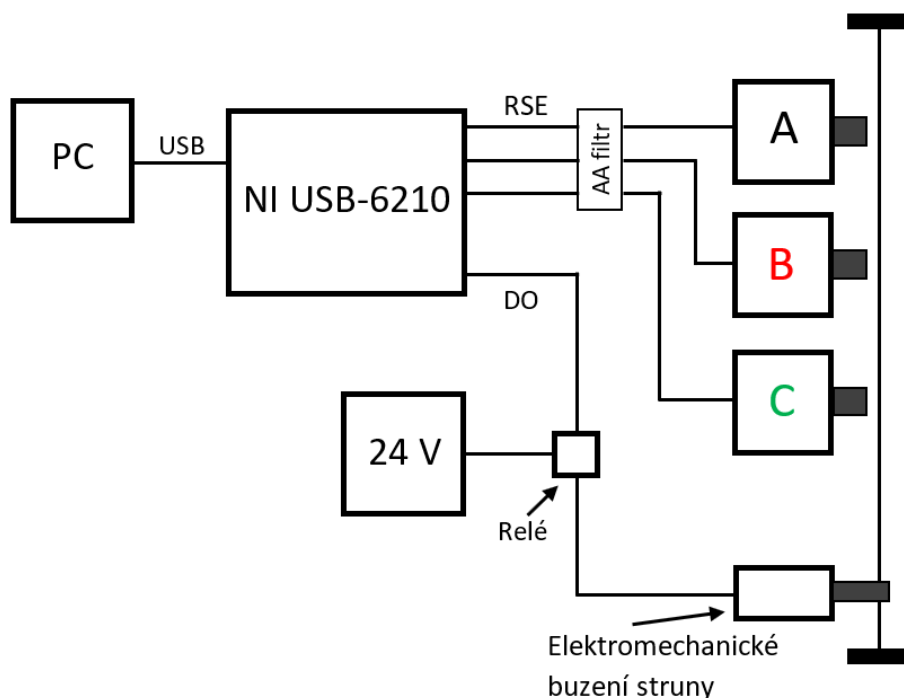
V měřicí smyčce aplikace dochází ke sběru časových oken (2000 vzorků) a jejich zpracování (Obr. 24). S každým průběhem smyčky probíhá filtrace, zpracování FFT z časového okna, zápis do grafů, kumulování dat a také počítání času měření. Jakmile nastavený čas měření uplyne, je hlavní smyčka ukončena a nakumulovaná data se zpracují ve výslednou FFT a uloží.

5 Měření

Měření na přípravku je prováděno s více snímači současně, aby šlo naměřená data porovnávat. Data ze snímačů nejsou totožná, jelikož jsou záměrně umístěny v různých bodech struny. Data se zobrazují v časových a frekvenčních oblastech.

5.1 Měřicí řetězec

Po vybuzení struny nastává tlumené kmitání se základní frekvencí, na jaké kmitá struna (Obr. 26). Na přípravku je struna naladěna na 100 Hz.



Obr. 25 Schéma měření

Snímače jsou zapojeny přes antialiasingový filtr do analogových vstupů DAQ karty NI USB-6210 (Obr. 25). Do DAQ karty jsou jednotlivé kanály napojeny jako RSE vstupy (měření proti zemi). Protože má struna základní frekvenci 100 Hz a pro účely laboratorní úlohy stačí sledovat 8 až 10 harmonických frekvencí (800 Hz až 1 kHz), má antialiasingový filtr mezní frekvenci přibližně 5 kHz (6). Antialiasingový filtr slouží k odfiltrování vyšších frekvencí než dovozuje vzorkovací teorém. V případě vzorkování 50 kS/s tedy slouží k odfiltrování

frekvencí nad 25 kHz, které by se nesprávně navzorkovaly a ve spektru se zobrazily v podobě alias signálů.

Jako antialiasingový filtr slouží v zapojení pasivní filtr typu dolní propust prvního řádu. Hodnota odporu RC článku je zvolena 330 Ω z řady E12. Kondenzátor byl dopočítán (5).

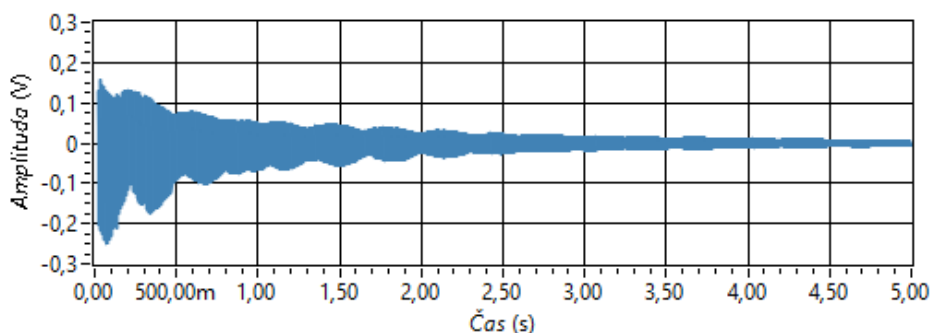
$$C = \frac{1}{2\pi R f_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 330 \cdot 5000} \doteq 96,46 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad (5)$$

Hodnota kondenzátoru je zaokrouhlena na 100 nF. Po zaokrouhlení je mezní frekvence filtru 4 822,9 Hz (6).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 330 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} \doteq 4\,822,9 \text{ Hz} \quad (6)$$

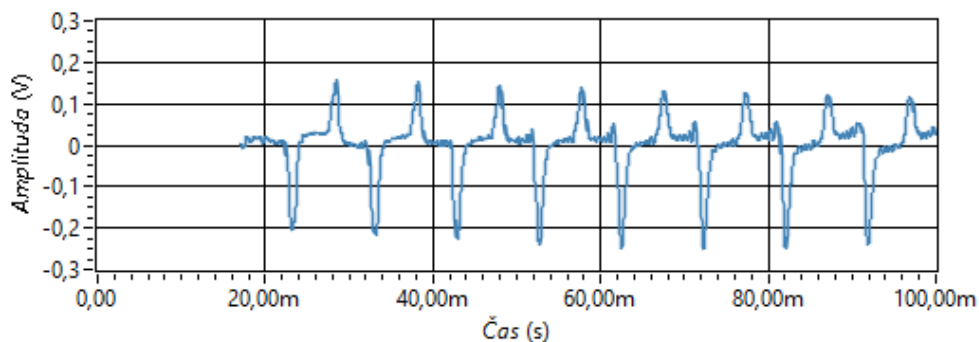
5.2 Analýza signálu ze snímače v časové oblasti

Buzení struny je ovládáno digitálním výstupem DAQ karty pomocí aplikace. Digitální výstup spíná relé, které propojí obvod pro sepnutí elektromagnetu.



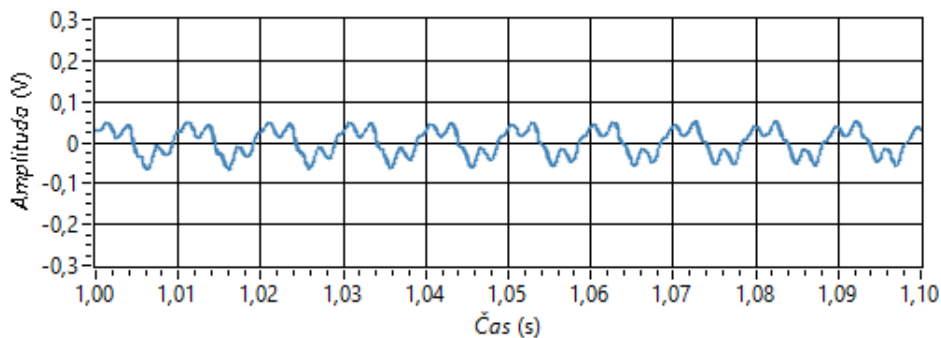
Obr. 26 Průběh odezvy struny v čase (snímač v polovině délky struny)

Na počátku vybuzení struny nejsou kmity zcela ustáleny a obsahují různé frekvence, které po krátké době odezní (Obr. 27). Již z neustáleného kmitání je možno z grafu zjistit základní frekvenci struny 100 Hz.



Obr. 27 Průběh odezvy struny těsně po vybuzení

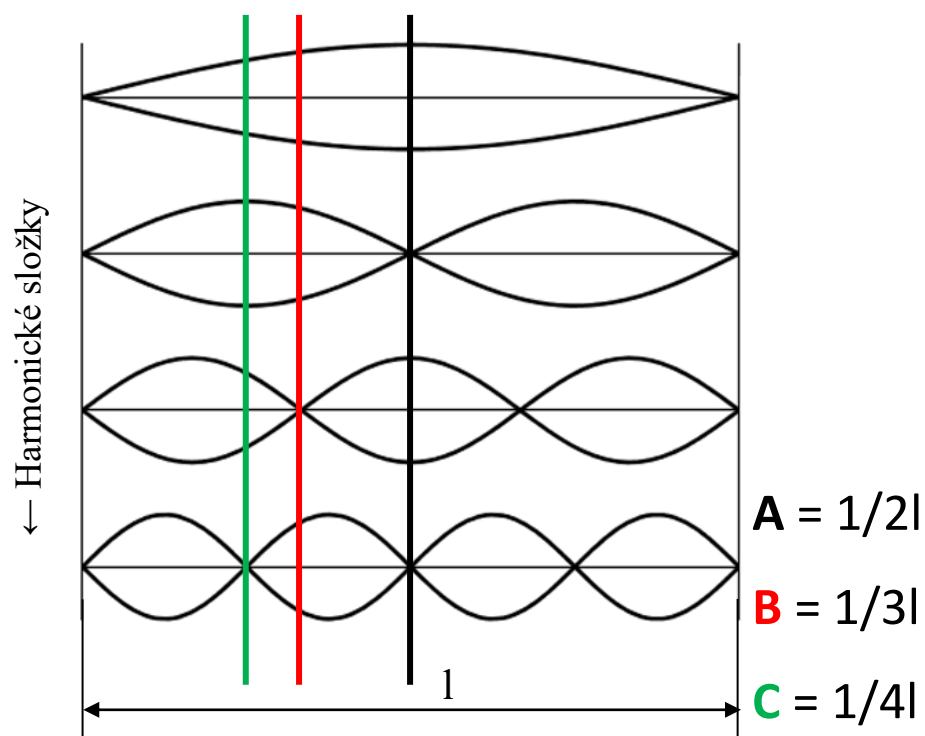
Po odeznění přechodového jevu se kmity ustálí a postupně utlumují (Obr. 28). Opět jde zřetelně vidět základní frekvence 100 Hz.



Obr. 28 Průběh odezvy struny po ustálení

5.3 Analýza signálu ze snímače ve frekvenční oblasti

Data z těchto snímačů jsou také vyhodnocována ve frekvenční oblasti. Z principu chvění struny nejsou amplitudy harmonických frekvencí v různých bodech struny stejné, ale hodnoty vyšších harmonických se mění v závislosti na poloze snímání chvění struny, jelikož se na její délce nacházejí uzlové body a kmitny (Obr. 29). Jsou to vždy celočíselné díly délky struny. Tedy $1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$ atd. V základní konfiguraci zařízení jsou snímače v polovině, třetině a čtvrtině délky struny.



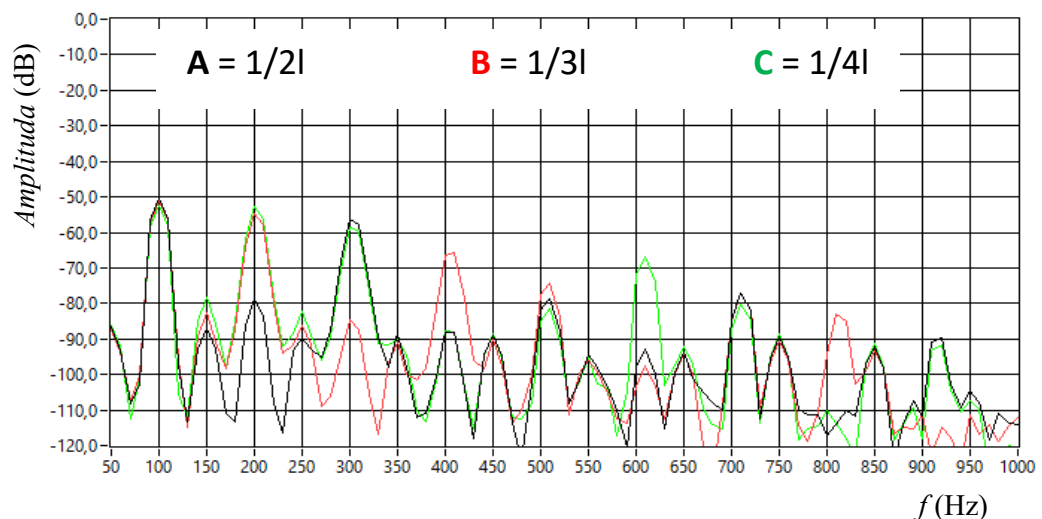
Obr. 29 Znáznornění polohy snímačů k uzlovým bodům harmonických frekvencí [12]

V těchto bodech by v ideálním případě neměly být měřitelné vyšší harmonické frekvence struny, které zde mají uzlový bod. V tabulce (Tab. 1) jsou vypsány poměry délky uzlových bodů pro nejbližší harmonické frekvence struny a barevně zvýrazněny ty, ve kterých jsou umístěny snímače. Pro druhou harmonickou tedy platí, že má uzlový bod pouze v polovině. Tam má uzlový bod i 4, 6 a každá sudá harmonická. V ideálním případě by tedy tyto harmonické frekvence nešly v daných bodech na struně měřit.

Tab. 1 Uzlové body na struně

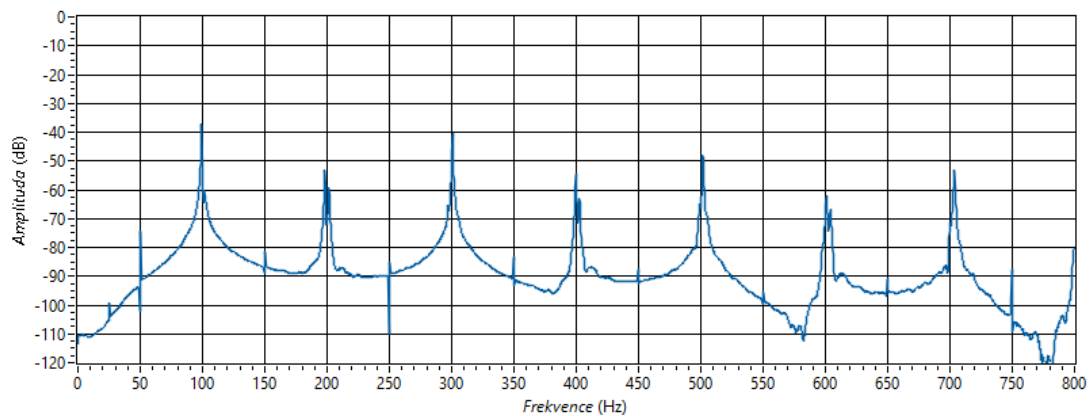
Harmonické složky ↓	Násobky délek →						
	1	2	3	4	5	6	7
	1						
	2	0,5	1				
	3	0,333	0,667	1			
	4	0,25	0,5	0,75	1		
	5	0,2	0,4	0,6	0,8	1	
	6	0,167	0,333	0,5	0,667	0,833	1
	7	0,143	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857
	8	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75
	9	0,111	0,222	0,333	0,444	0,556	0,667
	10	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	11	0,091	0,182	0,273	0,364	0,455	0,545
	12	0,083	0,167	0,25	0,333	0,417	0,5

Graf vyobrazuje spektra naměřených signálů ze tří snímačů (Obr. 30). Polohu tří snímačů k uzlovým bodům znázorňuje obrázek (Obr. 29). Při porovnání grafu (Obr. 30) s tabulkou (Tab. 1) je vidět, že první (základní) harmonickou frekvenci 100 Hz snímají všechny snímače s podobnou amplitudou. Snímač v polovině snímá první harmonickou v kmitně a ostatní také nejsou v uzlových bodech. Pro kmitočet 200 Hz náleží na struně jeden uzlový bod v polovině délky. Snímač, který snímá v místě uzlového bodu druhé harmonické frekvence, měří tuto frekvenci s výrazně nižší amplitudou. Pro frekvenci 300 Hz jsou uzlové body ve třetinách délky struny. Při frekvenci 400 Hz (čtvrtá harmonická) jsou zaznamenány uzlové body již dva. A to snímači umístěnými v polovině a čtvrtině. Protože čtvrtá harmonická má uzlové body ve čtvrtinách délky, a tedy i v polovině (Tab. 1, řádek 4).



Obr. 30 Měřené intenzity vyšších harmonických

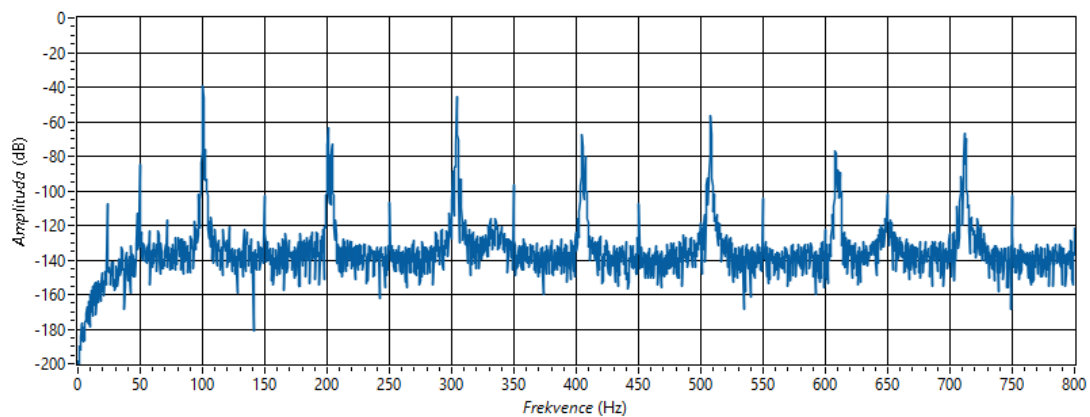
Po uplynutí času, který se pro sběr dat nastaví, dojde k výslednému vyhodnocení celého časového okna. Jelikož je zde k dispozici větší časové okno, je i krok na frekvenční ose menší (Obr. 31) (3). Tyto FFT je už možné mezi sebou porovnávat a dále analyzovat data (dojde k uložení celého časového okna i výsledné FFT). Jelikož na počátku vybuzení nejsou kmity ještě zcela ustáleny (Obr. 27), má uživatel v aplikaci možnost tato data ze zpracování výsledné FFT, pro dosažení lepších výsledků, vynechat (položka „Doba čekání (s)“ Obr. 17).



Obr. 31 Výsledná FFT pro snímač umístěný v polovině (bez použití okenní funkce)

Ve výsledné FFT z celého časového okna lze analyzovat intenzity harmonických frekvencí. V základu je v programu implementován výpočet FFT bez použití okenní funkce viz Obr. 21. Výsledná FFT bez použití váhového okna (Obr. 31) má menší odstup harmonických

frekvencí od šumu, ale přehlednější průběh. Totožná FFT po aplikaci Hanningova váhového okna (Obr. 32) má odstup harmonických frekvencí od šumu větší, ale zvýrazní se současně velmi slabé signály, které pro toto měření nemají význam.

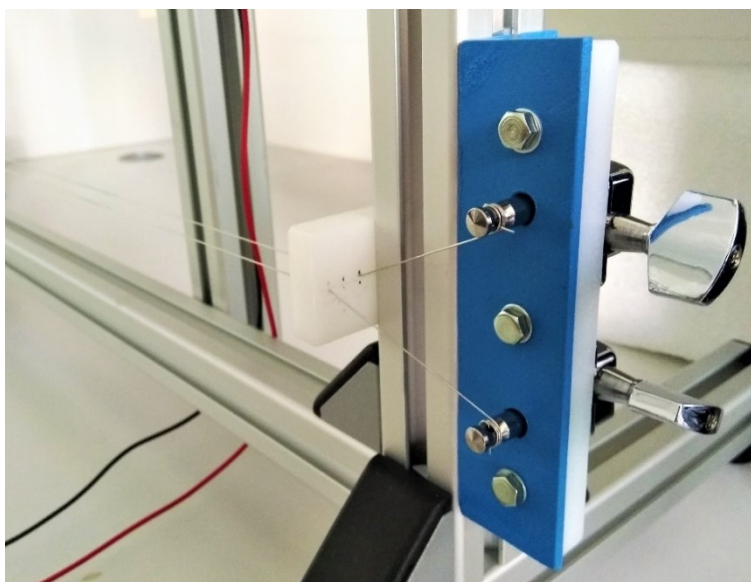


Obr. 32 Výsledná FFT pro snímač umístěný v polovině (s použitím okenní funkce)

6 Úloha pro měření vzdálenosti kuličky pomocí změny odporu

Na žádost správce laboratoře byla na přípravku, nad rámec bakalářské práce, realizována také úloha, při které se měří poloha ocelové kuličky pomocí změny hodnoty odporu odporové dráhy tvořené dvěma strunami a ocelovou kuličkou.

Pro tuto úlohu bylo nutné zajistit 2 odizolované (alespoň z jedné strany), rovnoměrně natažené struny. To je řešeno uchycením strun pomocí polyethylenové desky (Obr. 35). Samotné struny jsou od sebe vzdáleny 10 mm. Tuto vzdálenost zajišťuje umístění otvorů v deskách, které struny na obou stranách drží (Obr. 33). Materiál pro strunu byl opět zvolen Kanthalový drát o průměru 0,5 mm s měrným odporem $\rho_d = 7,23 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 33 Nasměrování strun

Obě struny, tvořící odporovou dráhu úlohy, je opět možné plynule napínat pomocí napínacího mechanismu (Obr. 34).



Obr. 34 Detail napínacího mechanismu pro úlohu se dvěma strunami



Obr. 35 Řešení izolace strun

Závěr

V rámci bakalářské práce byl sestaven přípravek pro měření vibrací struny a naprogramována obslužná aplikace. Byla řešena mechanická konstrukce a výroba přípravku, osazení přípravku senzory a budičím mechanismem a naprogramování obslužné aplikace. Tento přípravek je možné využívat pro výuku předmětů zabývajících se snímáči a zpracováním dat. Snímače na přípravku jsou schopny detekovat harmonické frekvence a uzlové body struny. Snímaná data jsou zobrazována v časové a frekvenční oblasti. Tato data je možné ukládat a provádět jejich následnou analýzu v jiné aplikaci (Microsoft Excel, aj.).

Mechanickou úpravou uchycení struny na přípravku je možné realizovat strunový tenzometr, který využívá k měření působící síly závislost síly na změně napnutí struny, a tedy frekvenci. Změny frekvence by mohly být snímány již vestavěnými indukčními snímáči.

Jako další snímač je možnost vestavět do konstrukce mikrofon, který bude snímat zvuk vydávaný strunou. Pro toto rozšíření by bylo vhodné zesílit zvuk rezonanční deskou, o kterou by se struna opírala a přenášela tak vibrace na desku. Zvuk vydávaný strunou by měl poté větší intenzitu. Na konstrukci je možné upevnit senzory pro snímání vibrací konstrukce, zvuku, vzdálenosti struny při kmitání atd.

Výše popsaná rozšíření by nezasáhla do současné úlohy. Na přípravku by tedy mohly být všechny tyto úlohy nachystány současně a měření provádět dle potřeby.

Použitá literatura

- [1] Prvky pro tlumení vibrací. *Mmspektrum* [online]. Praha: Ing. Emil Černý, 2016 [cit. 2019-4-9]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/prvky-pro-tlumeni-vibraci.html>
- [2] Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů. *Automatizace.hw* [online]. Praha: Antonín Vojáček, 2015 [cit. 2019-3-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [3] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [4] Bezkontaktní indukční snímače přiblížení – obecný popis. *Automatizace.hw* [online]. Praha: Antonín Vojáček, 2014 [cit. 2019-3-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>
- [5] Aktivní vs. Pasivní snímače?. *Svetkapel* [online]. Praha: Lukáš Konečný [cit. 2019-4-7]. Dostupné z: <http://www.svetkapel.cz/aktivni-vs-pasivni-snimace/>
- [6] SCHMID, P. *Zkušebnictví a technologie-Modul BI02-M02-Stavební zkušebnictví*. [1. Vydání elektronických opor] Brno : FAST VUT v Brně.
- [7] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [8] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [9] Drážky pro struny. *Housle Lanc* [online]. Praha: Václav Lanc, 2008 [cit. 2019-3-22]. Dostupné z: <http://www.houslelanc.cz/serizovani-nastroje/drazky-pro-struny/>
- [10] Spojitá prostředí: rovnice struny. *Katedra didaktiky fyziky* [online]. Praha: Doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc., 2014 [cit. 2019-4-9]. Dostupné z: https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/Teoreticka_mechanika/TM_10_SpojiteProstredi_ver_01a.pdf
- [11] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [12] STOJATÉ VLNĚNÍ. *Techmania* [online]. Plzeň: Mgr. Magda Králová [cit. 2019-4-7]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/vlneni/stojate-vlneni>

Seznam příloh

- I. Aplikace pro měření kmitů struny
- II. Výkresová dokumentace k přípravku